

ГОЛОВОКОВ С. В., БРОСТИЛОВА Т. Ю., ЧУКАРЕВА М. М.
ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы повышения эффективности использования технологического оборудования и кабелей на внутренних линиях солнечной электростанции. Представлены результаты моделирования с трансформаторами различной мощности. Даны рекомендации по повышению эффективности и увеличению загрузки линий электропередач.

Ключевые слова: солнечная электростанция, солнечная панель, инвертор, трансформатор, линии электропередач, потери мощности, расход меди.

GOLOBOKOV S. V., BROSTILOVA T. YU., CHUKAREVA M. M.
OPTIMIZATION OF POWER TRANSMISSION LINES
OF A SOLAR POWER PLANT

Abstract. The article discusses the issues of increasing the efficiency of the use of technological equipment and cables on the internal lines of a solar power plant. The results of modeling with transformers of various capacities are presented. Recommendations have been issued to improve efficiency and increase the load of power lines.

Keywords: solar power plant, solar panel, inverter, transformer, power lines, power loss, copper consumption.

Развитие технологии фотоэлектрических генераторов, которые также называют солнечными панелями, позволило существенно снизить их цену и сделало доступными для широкого применения. Другое направление – силовая электроника, начало выпускать тиристоры на высокое напряжение с токами отключения до 100 А. На основе тириستоров построены инверторные преобразователи, которые значительно расширили область применения солнечных панелей. Солнечная энергетика получила возможность подключения к распределительным сетям и стала частью промышленной энергетики [1].

Проектирование солнечной электростанции (СЭС) выполняется с целью максимального использования потенциала солнечного излучения в регионе. При этом решается ряд задач – построение главной схемы, схемы собственных нужд, проектирование преобразовательных и трансформаторных подстанций, конструктивное исполнение солнечных панелей, размещение оборудования на территории СЭС, схему выдачи мощности во внешние сети [2]. Решение отдельных задач должно быть взаимоувязанным, необходимо выполнить требования по надежности, безопасности и энергетической эффективности.

Одновременное выполнение всех требований невозможно, поэтому выбирается вариант проекта, при котором будет оптимальное сочетание капитальных вложений и эксплуатационных затрат. Основным критерием оптимизации при проектировании объектов электроэнергетики берутся минимизация приведенных затрат. Выбор силового оборудования и кабельной продукции необходимо провести с учетом экономических показателей – цены комплектующих и стоимости пусконаладочных работ. Главным критерием проекта будут выступать технико-экономические показатели, в том числе, себестоимость 1 МВт-ч произведенной электроэнергии.

Оптимизация параметров солнечной электростанции включает в выбор номинального напряжения, мощности технологического оборудования, схемы подключения и конструктивного исполнения линий электропередачи (ЛЭП), размещения на местности солнечных панелей, коммутационной аппаратуры, трансформаторных и преобразовательных подстанций.

Важная роль отводится проектированию ЛЭП, которые обеспечивают транзит мощности и оказывают влияние на показатели работы СЭС. На тепловых электростанциях генерирующее оборудование установлено в машинном зале и имеет несколько вариантов подключения. Протяженность ЛЭП не превышает сотен метров и их расчеты и строительство выполняются по классическим методикам. СЭС относится к распределенной генерации, солнечные панели размещаются на территории площадью в несколько сотен гектаров, протяженность ЛЭП достигает нескольких десятков км [1].

Разная длина ЛЭП от солнечных панелей до ТП приводит к разнице их полного сопротивления. При работе нескольких модулей за счет разного сопротивления ЛЭП их выдаваемая мощность будет отличаться. Большая протяженность увеличивает капитальные затраты на строительство СЭС. Разветвленная сеть на открытой местности подвержена внешним воздействиям, в распределительной сети в процессе эксплуатации возникают отказы, показатели надежности работы ЛЭП снижаются.

Задача повышения эффективности и оптимизации режимов работы СЭС является одной из главных как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации. Характерной особенностью СЭС является зависимость выдаваемой мощности от погодных условий, географических особенностей, времени года и времени суток. На рисунке 1 представлены графики солнечной инсоляции для региона Поволжья в зависимости от погоды и времени года [3].

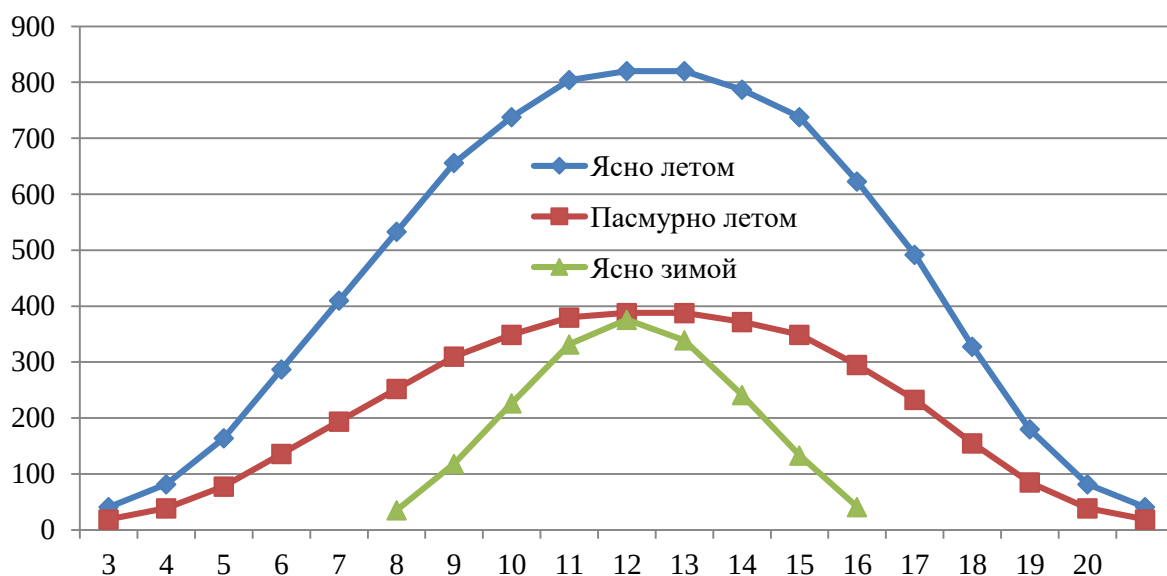


Рис. 1. Мощность солнечного излучения в Вт/м².

Максимальная мощность солнечного излучения наблюдается в полдень в апреле и мае месяце, для Поволжья она составляет 860 Вт/м². Зимой и в пасмурную погоду летом мощность падает наполовину. Во время дождя или снегопада СЭС мощность не выдает. Зимой световой день сокращается и время работы СЭС также уменьшается.

В качестве основного генерирующего оборудования принимаем солнечные панели «Silasolar-400vt» производства Китая с напряжением 44 В [4]. Солнечные панели группируют в модули. Внутри модуля солнечные панели включают в цепи последовательно, при этом повышается напряжение на выводах линейки. В цепь каждой линейки включен выравнивающий резистор сопротивлением 0,1 – 0,03 Ом. Падение напряжения на резисторах выравнивает токи в соседних линейках и обеспечивает равномерную загрузку.

Основными способами повышения надежности электроснабжения потребителей в распределительных сетях является секционирование, резервирование и ранжирование шин по вертикали. На СЭС большой мощности выполняют группировку солнечных панелей в модули и модулей на кластеры. Каждый кластер имеет трансформаторную подстанцию (ТП), к входам которой подключены несколько инверторов. Для снижения количества инверторных преобразователей их мощность повышается до значений, ограниченных максимальными токами тиристорных ключей.

При выборе схем соединения панелей необходимо задавать величину напряжения и отдаваемого тока на входных шинах ТП. При низком значении напряжения будут большие потери электрической мощности на внутри станционных линиях электропередач (ЛЭП). Для снижения тока в ЛЭП необходимо повысить напряжение транзита. С этой целью на трансформаторной подстанции установлен повышающий трансформатор 0,4/10 кВ (ТП). Применение серийных трансформаторов 0,4/10 кВ позволяет решить проблемы с поставками

комплектующих на этапе строительства и проблемы запасных частей в процессе эксплуатации.

При работе с высоким напряжением в режиме номинальной мощности токи падают, и потери снижаются. Для получения высокого напряжения в линейку включено большое число солнечных панелей. При отказе любой из них выходит из строя вся цепочка, мощность генерации падает. В итоге снижается надежность отдельных модулей СЭС.

Выбор напряжения, на котором ведется выдача мощности, выполняется по традиционным методикам. Номинальное напряжение зависит от мощности транзита и длины ЛЭП. Как правило, выдача мощности до 1 МВт ведется на напряжении 10 кВ, расстояние передачи - несколько километров [7]. Мощность транзита до 10 МВт ведется на напряжении 35 кВ, расстояние – десятки километров. Передача большей мощности на расстояние до 100 км требует напряжения 110 кВ. Выбор напряжения также определяется характеристиками силового оборудования, поставляемого производителями на рынок.

Исходными данными проекта СЭС будет установленная мощность энергоблока – 10 МВт, размещение в Европейской части нашей страны на широте 40 – 45 °СШ. Выдача мощности в магистральные сети напряжением 110 кВ. Для ГПП можно применить один трансформатор 10/110 кВ мощность 10 МВА или два трансформатора мощностью по 6,3 МВА.

Каждый модуль имеет свой инвертор, работа которого синхронизирована с шинами 110 кВ ГПП[5]. На выходе инвертора получаем переменный ток напряжением 0,4 кВ. В каждом кластере имеется одно-трансформаторная ТП 0,4/10 кВ. В зависимости от мощности трансформаторов в состав одного кластера будет включено разное число модулей.

В распределительных сетях стандартом предусмотрено действующее линейное напряжение 0,4 кВ. Для преобразования постоянного тока в переменный требуется получить напряжение на шинах постоянного тока, равное амплитуде фазного напряжения 364 В. Солнечные панели «Silasolar-400vt» работают с номинальным напряжением 44 В, максимальный ток составляет 10 А, напряжение холостого хода 48 В. В линейку включают 8 панелей, что обеспечивает напряжение на выводах 354 В. В одном модуле смонтировано 12 линеек, максимальный ток на выходе составляет 100 А.

Ночью СЭС не работает, утром и вечером мощность генерации солнечных панелей невысока. СЭС способна выдавать расчетную мощность только в течение 6-8 ч светового дня. На рисунке 2 представлены графики мощности солнечной панели для региона Поволжья.

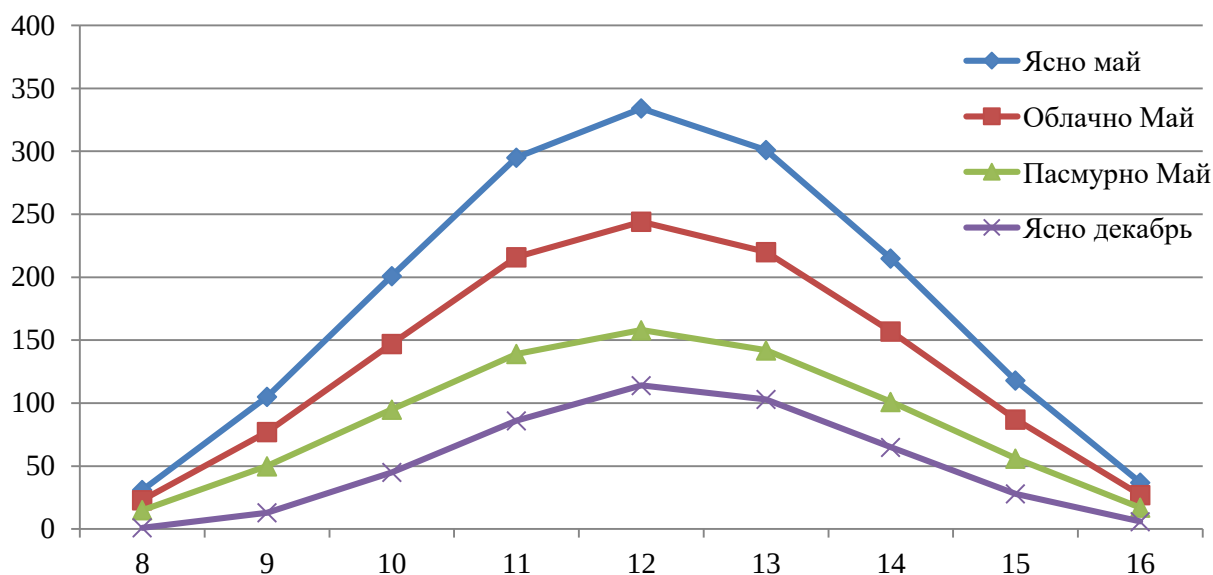


Рис. 2. Мощность солнечной панели в течение рабочей смены.

Выполним моделирование режимов работы модулей и ТП для разных климатических условий. По архивным данным ГисМетео получены значения солнечной инсоляции в мае 2020 г. На рисунке 3 представлен график времени работы (ч) в течение месяца солнечной панели с заданным током.

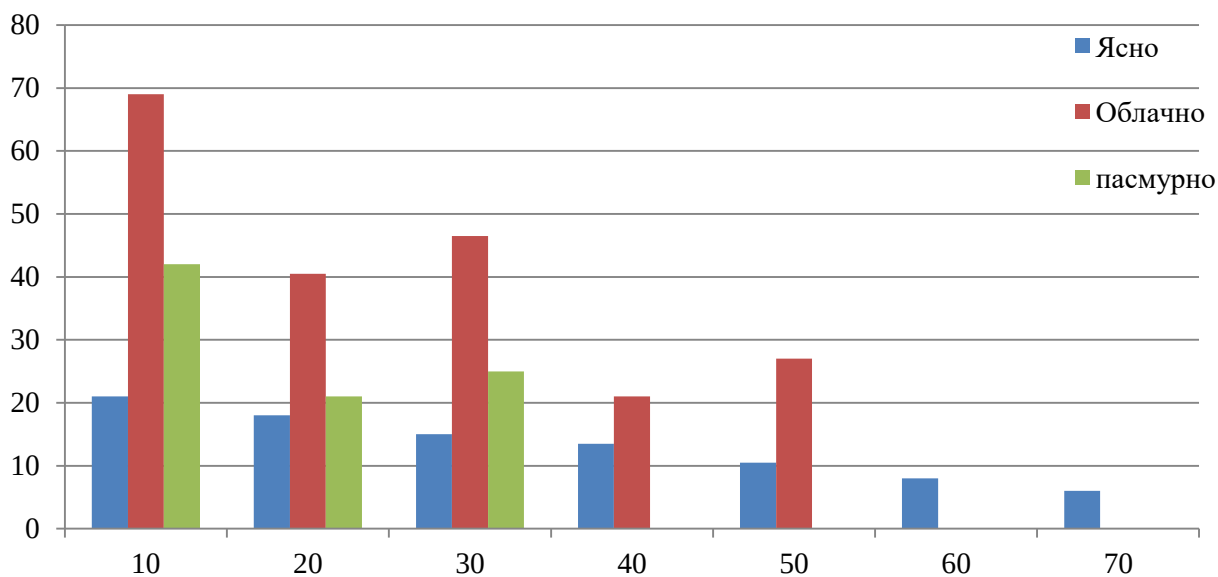


Рис. 3. Временные диаграммы работы СЭС.

При составлении главной схемы необходимо решить оптимизационную задачу выбора мощности и числа повышающих трансформаторов и преобразовательных подстанций. Передача мощности на генераторном напряжении ведется линиями постоянного тока. Величина тока достигает нескольких сотен ампер и сопровождается значительными потерями.

Для решения оптимизационной задачи выполнены расчеты на модели для четырех вариантов ТП мощностью 160, 240, 400 и 630 кВт. Выдача мощности одного модуля ведется на постоянном токе, при напряжении 360 В. Инвертор подключен к шинам постоянного тока. На один инвертор мощностью 80 кВт работают три модуля средней расчетной мощностью 26 кВт. Повышающий трансформатор подключен к общим шинам 0,4 кВ, на которые работают несколько инверторов. По территории СЭС транзит ведется кабельными линиями (КЛ) на напряжении 10 кВ. Результаты расчета мощности потерь и расхода кабелей на монтаж ЛЭП представлены в таблице 1.

Таблица 1

Эксплуатационные показатели КЛ для разных вариантов ТП

№	Р _{тр} , кВт	U, кВ	I, А	L, км	R, Ом	Р _{пот} , кВт	N	Р _{сум} , кВт	Р _{отн} , %	L _{сум} , км
1	160	0,36	80	0,18	0,053	0,34	6	259	39	69
2		0,4	231	0,74	0,054	2,89	2	358	54	91
3		10	9	0,4	7,8	0,67	62	41	6	24,8
						итого		658	7	185
1	240	0,36	80	0,32	0,062	0,40	9	440	44	118
2		0,4	347	0,46	0,034	4,09	3	491	50	55,2
3		10	14	0,28	7,6	1,46	40	59	6	11,2
						итого		989	10	185
1	400	0,36	80	0,45	0,053	0,34	15	652	47	173
2		0,4	578	0,34	0,016	5,35	5	668	48	42,5
3		10	23	0,17	5,7	3,05	25	76	5	4,25
						итого		1397	14	220
1	630	0,36	80	0,7	0,044	0,28	24	873	49	271
2		0,4	910	0,25	0,008	6,63	8	849	48	32
3		10	36	0,12	2,4	3,18	16	51	3	1,92
						итого		1773	18	305

Анализ данных таблицы 1 показывает, что при увеличении мощности ТП их число уменьшилось с 62 до 16. Для выдачи в ТП повышенной мощности растет число модулей и длина ЛЭП постоянного тока 360 В. При этом длина ЛЭП переменного тока 0,4 кВ в ЛЭП от инверторов к ТП незначительно снижается. А длина ЛЭП 10 кВ от ТП к ГПП снижается быстро. Общая длина кабелей, необходимых для монтажа распределительной сети СЭС увеличивается со 185 до 305 км, в основном за счет роста кабелей ШПТ.

При увеличении мощности ТП относительные потери в ЛЭП постоянного тока возрастают с 39 до 49%. Потери в ЛЭП 0,4 кВ снижаются с 54 до 48%. Потери в КЛ 10 кВ также снизились вдвое с 6 до 3%. Причем потери в КЛ 10 кВ незначительные, а потери в ЛЭП 360 В и в ЛЭП 0,4 кВ делятся примерно поровну. В ЛЭП низкого напряжения теряется 95% от общих потерь.

Дальнейшее наращивание мощности ТП нецелесообразно, поскольку приводит к увеличению тока и росту потерь. Снижение мощности ТП приводит к уменьшению тока в ЛЭП и снижению потерь электроэнергии на транзит. Но при этом резко растет число модулей, трансформаторов, ЛЭП, система усложняется и удорожается.

Для ТП мощностью 160 кВт суммарные потери составляют 658 кВт или 7% от выдаваемой мощности. Для ТП 240 кВт величина потерь равна 989 кВт или 10%. Самые большие потери в ЛЭП на входе ТП 400 и 630 кВт. В абсолютных величинах потери мощности на внутренних линиях составляют 1400 и 1770 кВт, выдаваемая СЭС мощность снижается на величину потерь. Для выполнения требований задания расчетную мощность СЭС придется увеличивать до 11,5 и 11,9 МВт. Потери мощности составляет 14 и 17%, превышают 10%, такой режим работы СЭС неэффективный. Потери мощности на внутренних ЛЭП СЭС при неблагоприятных погодных условиях снижаются, но все равно уменьшают полезную мощность.

Причиной высоких потерь является значительная длина ЛЭП, большой ток на низком напряжении и высокое сопротивление ЛЭП. Для подключения модуля к преобразовательной подстанции применяется кабель с медными жилами сечением 16 мм². Согласно данным таблицы 1.3.6 ПУЭ 7, длительно допустимый ток по условиям нагрева для такого кабеля при прокладке на воздухе составляет 105 А. Для снижения потерь мощности в ЛЭП подключения солнечных панелей к ТП 400 и 630 кВт применен кабель большего сечения 25 и 35 мм². Но замена кабеля приводит к увеличению показателя металлоемкости и значительному росту цены. Эффективность капиталовложений при этом снижается.

Пиковая мощность модуля и максимальный ток будет протекать в жилах кабеля только в полдень в весенние месяцы. С учетом суточного изменения солнечной радиации и случайного характера погодных условий в районе строительства СЭС, максимальная мощности генерации будет крайне редкой. Продолжительность пиковой генерации в средних широтах не превышает 2 часов. В остальное время мощность будет ниже.

Снижение солнечной радиации не позволяет повысить коэффициент загрузки трансформаторов и уменьшает объем выработки электроэнергии. Большую часть времени мощность СЭС меньше расчетной, технологическое оборудование и ЛЭП недогружены [6]. С целью повышения эффективности ЛЭП постоянного тока, которыми модули подключены к инвертору, предлагается выполнить кабелем уменьшенного сечения. Вместо кабеля 16 мм² можно применить кабели 10 или 8 мм².

На рисунке 4 показаны кривые тока в течение светового дня, протекающего в ЛЭП с разным сечением кабелей.

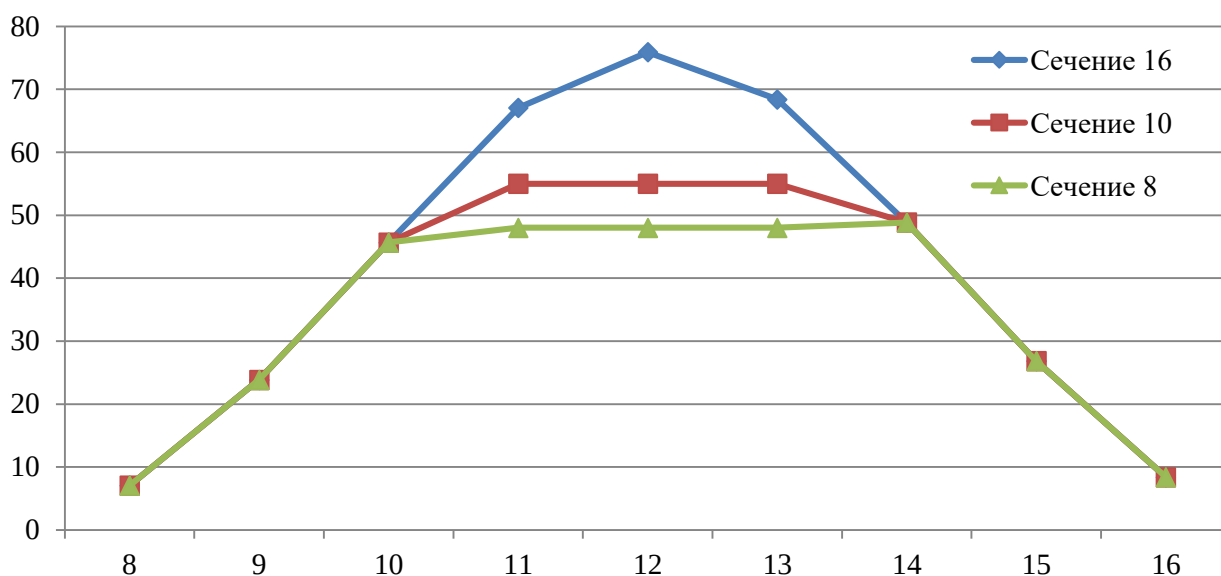


Рис. 4. Ограничение тока в ЛЭП уменьшенного сечения.

В соответствии с диаграммой на рисунке 3 время работы солнечных панелей с током 60 и 70 А составляет 8%. В эти периоды ток, отдаваемый модулем будет ограничен до 50 А. На суммарную выработку электроэнергии такое снижение тока почти не влияет. Относительное снижение составит менее 2% от месячной выработки, а при неблагоприятной погоде не сказывается совсем.

Ранжирование устанавливает последовательность отключения шин при аварийных ситуациях. Аварийное отключение одного участка или вывод его в плановый ремонт снижает максимальную мощность электростанции, но не останавливает ее работу. Поскольку нагрузка в энергосистеме постоянно изменяется и редко достигает максимума, такое ограничение мощности в большинстве случаев не влияет на электроснабжение большинства потребителей. Но снижение сечения кабелей с 16 до 10 или 8 мм² дает 60 или 100% снижение металлоемкости кабелей и стоимости проекта.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Применение СЭС в Поволжье для выработки электроэнергии в промышленных масштабах вызывает серьезные трудности неравномерной генерацией в течение месяца и малой мощностью в утренние и вечерние часы.
2. Резкое снижение мощности генерации и времени работы в зимнее время не позволяют использовать СЭС для покрытия нагрузок в энергосистеме в зимний период и делают ее эксплуатацию неэффективной.
3. Применение ТП мощности более 240 кВт в составе СЭС мощностью более 10 МВА приводит к росту потерь на внутренних линиях более 10%.

4. Применение ТП мощностью менее 240 кВт также приводит к снижению расхода кабелей в ЛЭП постоянного тока и переменного тока низкого напряжения. Но при этом возрастает длина кабелей 10 кВ.

5. Большую часть времени СЭС выдают мощность не более 30% от расчетной, при этом трансформаторы, инверторы и ЛЭП работают в режиме малых нагрузок. Силовое оборудование эксплуатируется неэффективно.

6. С учетом малого времени работы СЭС в режиме максимальной мощности рациональным решением будет замена кабеля 16 на кабели сечением жил 10 или 8 мм². На объем выдачи электроэнергии эта замена не повлияет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, № 8. – С. 937–948.
2. Тимофеев М. Н., Тимофеев А. Н. Использование системного подхода для выбора структуры гибридной электростанции на примере Саратовской области // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2018. – Т. 7. – № 4(44). – С. 61-66.
3. Климат Пензы / Под ред. д-ра геогр. наук Ц. А. Швер, В. С. Никулиной, И. А. Поповой. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. – 180 с.
4. Каталог продукции фирмы «Silasolar» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e-solarpower.ru/solar/solar-panels/mono-panel/solnechnaya-batareya-silasolar-400vt-perc-5bb/> (дата обращения 12.11.2022).
5. Goryachev V., Golobokov S., Michaylov A. The Complex Optimization of the Solar Power Plant Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future» (EAF 2021) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dx.doi.org/10.2991/aer.k.220308.011> (дата обращения 12.11.2022).
6. Голобоков С. В., Каворин А. О., Чукарева М. М., Душутин К. А. Перспективы развития альтернативной энергетики в северных районах России // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: Материалы Международной научно-практической конференции, Саранск, 25–26 ноября 2020 года / Редколлегия: П. В. Сенин [и др.], сост. С. Е. Федоров, отв. за выпуск В. Ф. Купряшкин. – Саранск, 2020. – С. 203–211.
7. Агеев В. А., Голобоков С. В., Лебедянцева А. А. Повышение эффективности энергоснабжения малых муниципальных районов // Энергосбережение и

инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов, Тюмень, 21–23 декабря 2020 года. –Том II. – Тюмень, 2020. – С. 165–167.